

BHM (2016) Vol. 161 (6): 246–251
DOI 10.1007/s00501-016-0482-6
© The Author(s) 2016. Dieser Artikel ist auf
SpringerLink mit Open Access verfügbar

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Prozesskette zum stofflichen Recycling von Kunststoffabfällen

Markus Lehner¹, Markus Bauer¹ und Wolfgang Hofer²

¹Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

²OMV Refining & Marketing GmbH, Wien, Österreich

Eingegangen 8. April 2016; angenommen 11. April 2016; online publiziert 31. Mai 2016

Zusammenfassung: Die stoffliche Recyclingquote von Kunststoffen liegt in Österreich derzeit bei nur etwa 25 %, da nur solche Kunststoffabfälle einem werkstofflichen Recycling zugeführt werden können, die schon als Abfall möglichst sortenrein und sauber anfallen. Eine signifikante Erhöhung des stofflichen Recyclings kann in einer Prozesskette durch eine Kombination aus nasser mechanischer Aufbereitung und thermochemischer Konversion gelingen. In der nassen mechanischen Aufbereitung werden Polyolefine und Polystyrol aus unterschiedlichen Abfallfraktionen angereichert, die als Aufgabematerial für eine lösemittelbasierte, thermische Depolymerisation eingesetzt werden. In dieser werden durch rein thermisches Cracken petrochemische Zwischenprodukte (z. B. kurz- und langkettige Kohlenwasserstoffe, Aromaten, Paraffine) erzeugt, die an geeigneter Stelle in eine konventionelle Rohöl-Raffinerie eingespeist und dort zu verwertbaren Produkten aufbereitet werden können. Auf diese Weise gelingt die Schließung des Stoffkreislaufes besonders wirtschaftlich. Sowohl nasse mechanische Aufbereitung als auch thermochemische Depolymerisation sind im Labormaßstab erprobt und werden derzeit in den Pilotmaßstab überführt.

Schlüsselwörter: Stoffliches Recycling, Kunststoffabfälle, Mechanische Aufbereitung, Thermochemische Konversion

Process Chain for the Material Recycling of Post-Consumer Plastic

Abstract: The material recycling rate for post-consumer plastic in Austria currently ranges around 25 %, because only post-consumer plastic fractions which are disposed as clean mono-materials are available for material recycling. A significant enhancement of the material recycling rate can be achieved with a process chain consisting of wet mechanical processing and thermochemical conversion. The wet mechanical process step enriches polyolefin and polystyrene from different waste sources, which are used as feedstock for a solvent-based, thermal depolymerisation. Via thermal cracking petrochemical intermediates (i.e. short- and long-chained, aromatic and paraffinic hydrocarbons) are produced, which can be appropriately fed into a conventional crude oil refinery and processed to marketable products. In this way, the material cycle can be closed economically feasible. Both the wet mechanical processing and the thermochemical conversion have been proofed in laboratory scale and are currently transferred to pilot scale.

Keywords: Material recycling, Post-consumer plastic, Mechanical processing, Thermochemical conversion

1. Einführung

Die EU-Abfallrahmenrichtlinie [1], die mit der AWG-Novelle 2010 in Österreich umgesetzt wurde, stellt gemäß ihrem hierarchischen Aufbau die stoffliche Verwertung von Abfällen vor die energetische Nutzung wie auch die Deponierung. Dieser zukünftige Weg der Abfallwirtschaft hin zu einer effizienten Energie- und Ressourcenwirtschaft ist insbesondere im Bereich der Kunststoffabfälle auch in Österreich noch kein Stand der Technik.

Kunststoffe zeichnen sich durch ihre vielseitige Anwendbarkeit, einfache produktspezifische Verarbeitbarkeit,

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Lehner (✉)
Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen
Umweltschutzes,
Montanuniversität Leoben,
Franz-Josef-Str. 18,
8700 Leoben, Österreich
E-Mail: markus.lehner@unileoben.ac.at

Abb. 1: Flussdiagramm der Kunststoffabfälle in Österreich auf Basis von Daten für das Jahr 2009 [2]

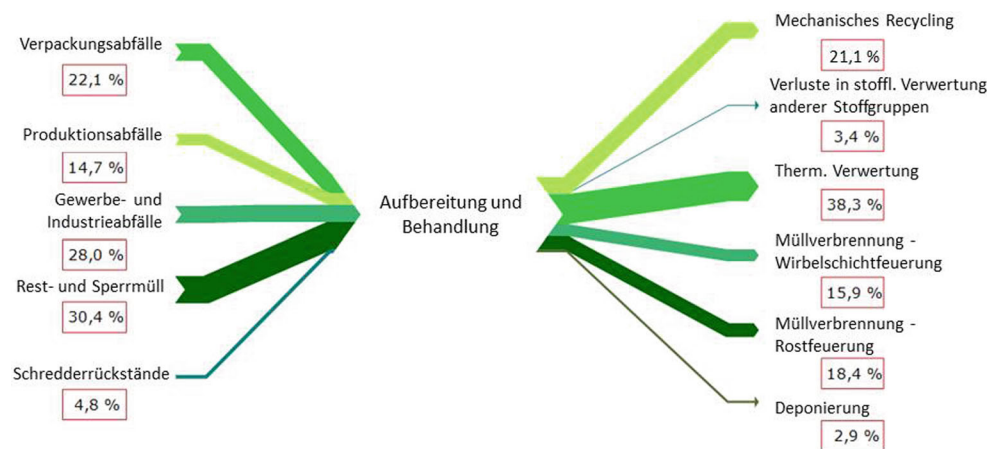
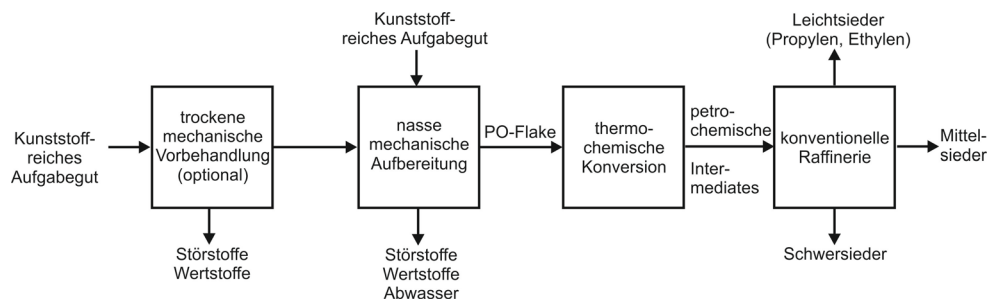


Abb. 2: Gesamte Verfahrenskette zum stofflichen Recycling von Polyolefinen



ihr geringes spezifisches Gewicht und nicht zuletzt ihren großen Kostenvorteil aus. Jedoch führen diese für den Produzenten und Konsumenten vorteilhaften Eigenschaften auch zu einer raschen und bedenkenlosen Austauschbarkeit. Am Ende der häufig sehr kurzen Lebenszyklen diverser Produkte und Güter (z. B. Verpackungsbereich) werden Kunststoffabfälle, abhängig von der Kunststoffart und der Sortenreinheit, im abfallwirtschaftlichen System nicht immer ressourceneffizient behandelt. Abgesehen von wenigen Ausnahmen, die die werkstoffliche Verwertung von vorsortierten, sortenreinen Altkunststofffraktionen (z. B. Bottle-to-Bottle-Recycling bei PET) betrifft, sind Recyclinglösungen zur effizienten und gleichzeitig ressourcenschonenden Kreislaufführung gemischter Kunststoffabfälle im Vergleich zu anderen Werkstoffen (z. B. Eisen und Stahl) noch nicht sehr weit entwickelt. Eine Studie der Kunststoffabfallströme für Österreich [2] zeigt, dass in Summe rund drei Viertel der Kunststoffabfälle in Mit- oder Monoverbrennungsanlagen zur Energierückgewinnung eingesetzt oder direkt deponiert werden (Abb. 1). Für Europa können ähnliche Zahlen gefunden werden, summiert man Verbrennung und Deponierung [3], wobei auch weltweit die direkte Deponierung als einfachste Form der Abfallbehandlung die bedeutendste Rolle spielt.

Rund ein Viertel der Altkunststoffe aus Österreich [2], analog in Europa [3], werden in Form von Aufbereitungs-, Wiederaufschmelz- und Reextrusionsprozessen zur Erzeugung von Kunststoffregranulat bereits werkstofflich recycelt. Kunststoffabfälle eignen sich jedoch nur dann für ein werkstoffliches Recycling, wenn sie sauber und möglichst sortenrein anfallen. Das trifft auf die Mehrheit der anfallenden Kunststoffabfälle jedoch nicht zu.

Neben dem werkstofflichen Recycling von Kunststoffen stellen die Pyrolyse oder thermische bzw. katalytische Crackverfahren eine weitere Option dar, die ein rohstoffliches Recycling (auch chemisches Recycling oder Feedstock-Recycling genannt) von Altkunststoffen ermöglichen. Durch thermochemische Konversion wird eine Rückgewinnung von Kohlenwasserstoffen erreicht, die nach weiterer Aufbereitung, z. B. in einer konventionellen Rohöl-Raffinerie, zu marktfähigen Produkten weiterverarbeitet werden können. Beispielsweise können durch neuerliche Polymerisation wieder hochwertige Kunststoffe hergestellt werden. Aus der Literatur ist bekannt [4–6], dass sich insbesondere Polyolefine (Polyethylen, Polypropylen), die den Hauptanteil am weltweiten Kunststoffverbrauch und -abfall ausmachen, als Einsatzstoffe für diesen Zweck eignen. Im Gegensatz zum werkstofflichen Recycling müssen die im chemischen Recycling eingesetzten Altkunststofffraktionen aber weder sortenrein noch störstofffrei sein, wodurch das Potenzial an möglichen Inputmaterialien erheblich ausgeweitet werden kann. Um eine Rückführung der Altkunststoffe in den Stoffkreislauf durch chemisches Recycling zu ermöglichen, müssen diese aus den diversen Abfallstoffgemengen mittels geeigneter mechanischer Verfahren abgetrennt und aufbereitet werden. Eine dafür geeignete Prozesskette wird nachfolgend dargestellt.

2. Prozesskette für das stoffliche Recycling

In Abb. 2 ist die gesamte Verfahrenskette des Prozesses für das stoffliche Recycling von polyolefinreichen Kunststoffabfällen dargestellt. Es wird ein Prozesskonzept verfolgt, in

dem in einer thermochemischen Konversion die Kunststoffabfälle nicht bis zu marktfähigen Produkten aufbereitet werden, sondern eine konventionelle Raffinerie als nachfolgender Prozessschritt eingesetzt wird. Durch die Nutzung bestehender Infrastruktur einer Raffinerie ist eine besonders hohe Wirtschaftlichkeit der Prozesskette gegenüber dezentralen Lösungen gegeben.

Die Erzeugung von in einer Raffinerie verwertbaren petrochemischen Zwischenprodukten (z.B. Naphta-, Kerosin-, Gasöl-Schnitt, Paraffine, Aromaten etc.) erfordert einen aufbereiteten, möglichst homogenen Aufgabestrom für die thermochemische Konversion. Fremdstoffe wie biogene Materialien, Papier, aber auch Polyvinylchlorid (PVC) haben negative Einflüsse auf den thermischen Konversionsprozess (z.B. Korrosion, Coking) und können auch nachfolgende Aufbereitungsschritte in einer herkömmlichen Rohöl-Raffinerie negativ beeinflussen. Da der Feedstock für eine thermochemische Konversion weder aus sortenreinen Kunststoffen bestehen, noch störstofffrei und sauber sein muss, ist die potenzielle Rohstoffbasis für ein thermochemisches Konversionsverfahren grundsätzlich sehr vielfältig. Voraussetzung ist, durch ein geeignetes Aufbereitungsverfahren einen homogenen, störstoffarmen Aufgabestrom zu erzeugen.

Abhängig vom Ausgangsmaterial ist eine trockenmechanische Vorbehandlung optional notwendig, die neben der notwendigen Zerkleinerung der Aufgabe zusätzlich die Ausschleusung von Stör- und Wertstoffen (z. B. Fe- oder NE-Metalle) ermöglicht (Abb. 2). Je nach Ausgangsmaterial ist die trockene mechanische Aufbereitung nach dem Stand der Technik zu gestalten, der bei Bauer beschrieben ist [7, 8]. In einer nachfolgenden nassen mechanischen Aufbereitungsstufe werden eine Leicht-, Mittel- und Schwergutfraktion nach dem Trennmerkmal Dichte erzeugt. Die Leichtgutfraktion besteht überwiegend aus den gewünschten Polyolefinen, die der thermischen Konversionsanlage zugeführt werden. Die nasse Behandlung stellt für den thermochemischen Konversionsprozess im Umfeld einer Raffinerie kein Problem dar, da dort sowohl ausreichend Niedertemperaturwärme für die Trocknung als auch eine industrielle Abwasserbehandlung vorhanden sind. Darüber hinaus ist ein gewisser Wasseranteil im thermochemischen Konversionsprozess als auch in der Raffinerie selbst völlig unschädlich, da nicht zuletzt auch der üblicherweise verarbeitete primäre Rohstoff, das Rohöl, Wasser enthält und entsprechende Behandlungsschritte in einer Raffinerie vorgesehen sind.

3. Nasse mechanische Aufbereitung

Der nasse mechanische Aufbereitungsprozess hat das Ziel, aus unterschiedlichen Kunststoffabfallfraktionen ein poly-

TABELLE 1:
„PO-Flake“-Spezifikation

Parameter	PO-Flake
Partikelgröße [mm]	< 30–40
Schüttdichte [kg/m ³]	50–100
Wassergehalt [%]	< 20
POS ^a -Gehalt tr. [%]	> 90
Störstoffe tr. [%]	< 10
Heizwert [MJ/kg]	> 30
Halogengehalt tr. [%]	< 2

^aPOS Polyolefine und Polystyrol

olefinreiches Konzentrat (nachfolgend mit „PO-Flake“ bezeichnet) für die nachgeschaltete thermochemische Konversion zu erzeugen. Die „PO-Flake“-Spezifikation kann Tab. 1 entnommen werden. Es handelt sich um eine polyolefin- und polystyrolreiche Fraktion (POS), die vorzerkleinert und reduziert an Störstoffen sowie Halogenen (z. B. aus PVC) ist.

Die nasse mechanische Aufbereitung besteht im Kern aus einem oder mehreren Zentrifugalkraftscheidern, die durch geeignete Verschaltung miteinander und durch weitere trockene und nasse mechanische Aufbereitungsstufen in der Lage sein müssen, sehr unterschiedlich zusammengesetzte Aufgabeströme zur gewünschten polyolefinreichen Fraktion aufzubereiten (Abb. 3; [10]), was derzeit Gegenstand des am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung angesiedelten Research Studio Austria „Plastic Reborn“ in enger Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes sowie Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft ist. Zentrifugalkraftscheider werden seit vielen Jahren zur Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen eingesetzt [9]. Sie zeichnen sich durch eine einfache, kompakte und robuste Bauweise sowie hohe erzielbare Durchsatzraten aus. Die Trennung erfolgt im strömungsinduzierten Zentrifugalkraftfeld, wobei ausgenutzt wird, dass die Zielfraktion „PO-Flake“ Dichten kleiner als von Wasser aufweist und deshalb als Leichtgutfraktion aus dem Zentrifugalkraftscheider ausgeschleust wird. In Tab. 2 und Abb. 4 sind Ergebnisse der Trennung von hochkalorischem EBS (Ersatzbrennstoff) dargestellt. Es wird deutlich, dass sowohl der Gehalt als auch das Inhaltsausbringen an PO-Flake in der Leichtgutfraktion Werte um bzw. über 90 % aufweisen, was hinsichtlich der Reinheit auch den Anforderungen aus Tab. 1 entspricht.

4. Thermochemische Konversion

Die Depolymerisation von Kunststoffen kann in zwei grundsätzlich unterschiedlichen Verfahrenskonzepten realisiert

TABELLE 2:
Ergebnisse eines Trennversuchs mit hochkalorischem EBS im Zentrifugalkraftscheider

	r _{mj} , %	g _{PO-Flake} , %	r _{PO-Flake} , %
Leichtgut	71,2	90,1	94,4
Schwergut	28,8	13,1	5,6
Aufgabe	100,0	67,9	100,0

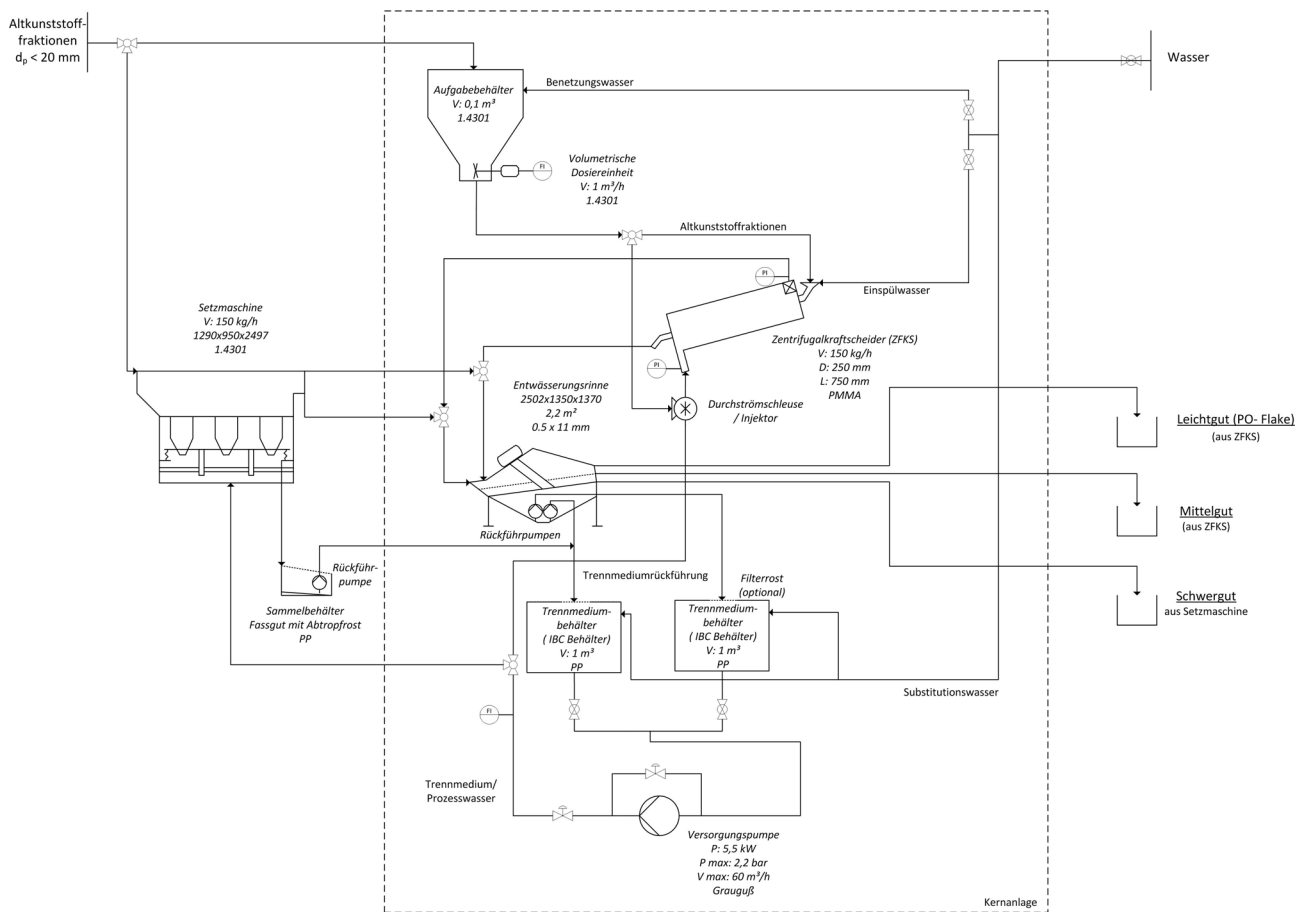
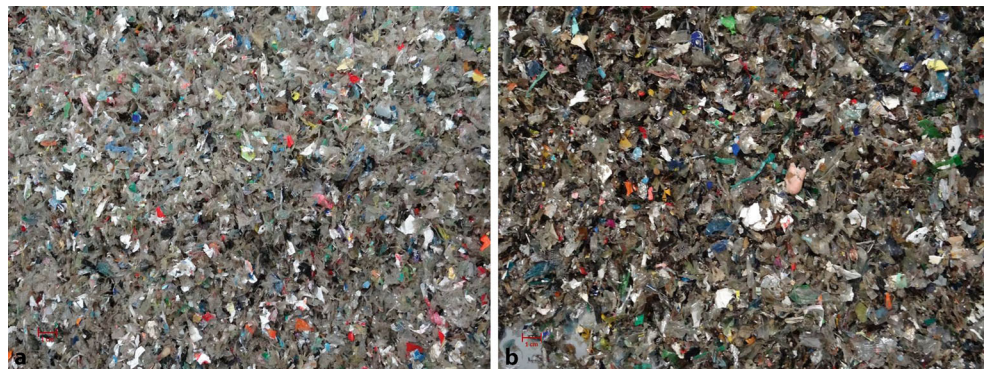


Abb. 3: Verfahrensschema der nassen mechanischen Aufbereitung

Abb. 4: Leichtgutfraktion (a) und Schwergutfraktion (b) aus dem Zentrifugalkraftscheider mit hochkalorischem EBS als Aufgabegut



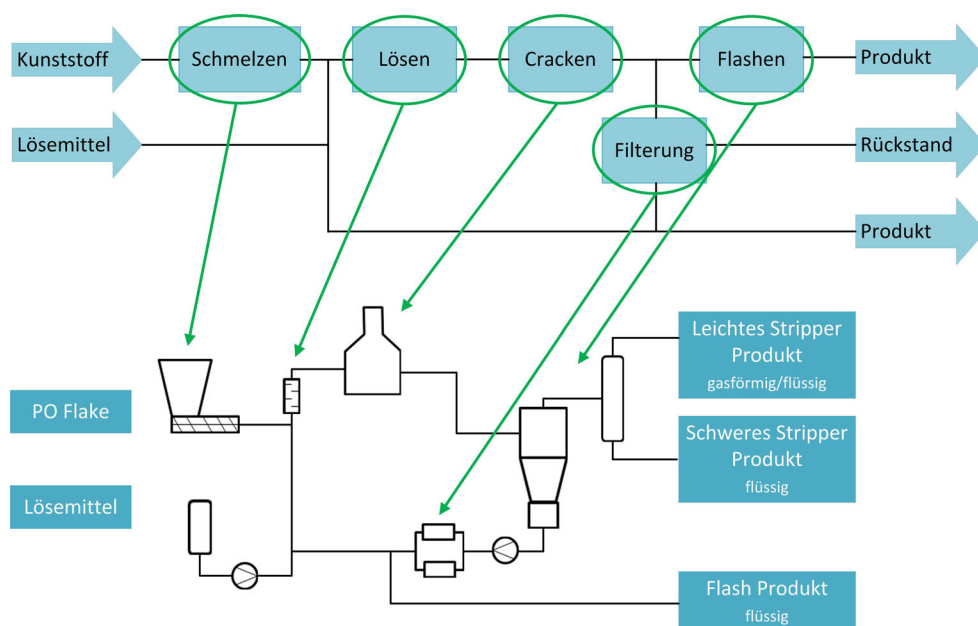
werden: Pyrolyse oder Vergasung. Während bei der Pyrolyse durch die Abwesenheit von Sauerstoff gasförmige, flüssige und feste Kohlenwasserstoffe gebildet werden, wird in der Vergasung in Anwesenheit von Sauerstoff ein Synthesegas, also eine Mischung aus CO , CO_2 , H_2 und ggf. höheren Kohlenwasserstoffen, erzeugt. Pyrolyseverfahren lassen sich weiter charakterisieren hinsichtlich der Prozesstemperatur, in katalytische und nicht-katalytische Prozesse sowie hinsichtlich der eingesetzten Reaktortypen [4, 10, 11].

In den vergangenen Jahrzehnten sind weltweit mehrere Dutzend verschiedene Verfahren entwickelt worden, von

denen sich aber bisher keines in einem industriellen Betrieb befindet [11]. Die Gründe dafür sind vielfältig, neben technischen spielen insbesondere auch Fragen der Wirtschaftlichkeit und der dauerhaften Verfügbarkeit geeigneter Ausgangsmaterialien eine Rolle. Die technischen Herausforderungen liegen unter anderem in den physikalischen Eigenschaften der Kunststoffe. Kunststoffschmelzen weisen eine hohe Viskosität und eine schlechte Wärmeleitfähigkeit auf. Dadurch wird deren Förderung, aber auch der für die Depolymerisation notwendige Wärmeeintrag erschwert.

In dem hier vorgestellten, neu entwickelten und patentierten Verfahrenskonzept zur thermochemischen Konver-

Abb. 5: Verfahrensschema des lösemittelbasierten Depolymerisationsprozesses



sion wird das in der mechanischen Aufbereitung gewonnene PO-Flake unter Luftabschluss in einem Extruder aufgeschmolzen und einem hochsiedenden Lösemittel beige-mischt (Abb. 5). Die eigentliche Depolymerisation erfolgt über rein thermisches Cracken in einem Rohrreaktor [12, 13]. Die Crackprodukte werden in einem Flashbehälter abgetrennt und das Lösemittel zum Teil im Kreislauf gefahren. Der Prozess wurde als Laboranlage für einen Durchsatz von bis zu 5 kg/h Kunststoffe errichtet.

Wie Abb. 5 zu entnehmen ist, ergibt die Depolymerisation von polyolefinreichen Kunststoffabfällen verschiedene Produkte, wie Leichtsieder, ein flüssiges, schwersiedendes Produkt sowie ein schwersiedendes Gasöl. Diese Produkte können ohne weitere Aufbereitung an verschiedenen Stellen einer konventionellen Raffinerie beige-mischt werden, beispielsweise dem Steamcracker, dem Fluid Catalytic Cracker (FCC) oder einer Thermal Gasoil Unit (TGU). Auf diese Weise wird der Stoffkreislauf vom gebrauchten Kunststoff hin zu verwertbaren Produkten geschlossen.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Erhöhung der stofflichen Verwertungsrate von Kunststoffabfällen kann durch eine Kombination aus nasser mechanischer Aufbereitung kunststoffreicher Abfallfraktionen mit einer lösemittelbasierten, thermochemischen Konversion im Umfeld einer konventionellen Raffinerie erreicht werden. In bisherigen Untersuchungen konnte der Proof-of-Concept von sowohl der nassen mechanischen Aufbereitung als auch der Depolymerisation durch thermisches Cracken in einem Lösemittel im Labormaßstab nachgewiesen werden.

Im Rahmen des Research Studio Austria „Plastic Reborn“ wird die nasse mechanische Aufbereitung an einem eigens errichteten Versuchsstand im Technikumsmaßstab weiter optimiert, wobei beispielsweise auch die Kombina-

tion des Zentrifugalkraftscheiders mit Setzarbeit untersucht wird. Die lösemittelbasierte Depolymerisation soll im Rahmen eines beantragten Leitprojektes der Energieforschung in einen Pilotmaßstab, bereits eingebettet in ein Raffineri-umfeld, überführt werden. Es sind im Zuge dieses Projektes auch grundlegende Untersuchungen zum Mechanismus des thermischen Crackens und zur Werkstoffauswahl und Korrosion geplant, die in enger Zusammenarbeit mit der Montanuniversität Leoben erarbeitet werden sollen.

Open Access This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

Literatur

1. Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle, Amtsblatt der Europäischen Union, 2008
2. Bauer, M.; Lehner, M.: Post-consumer plastics in Austria and their potential for chemical recycling. ISWA World Congress 2013 Vienna. Wien, 2013
3. Plastic Europe (ed.): Plastics – the Facts 2012 – An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011. Brüssel, 2012. <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-2012.aspx?FolID=2>, Stand: Oktober 2013
4. Scheirs, J.; Kaminsky, W.: Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics: Converting Waste Plastics into Diesel and Other Fuels. West Sussex: Wiley, 2006
5. Kumar, S.; Panda, A. K.; Singh, R. K.: A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. In: Resources, Conservation and Recycling 55 (2011) no. 11, pp. 893–910
6. Aguado, J.; Serrano, D. P.; Escola, J. M.: Fuels from Waste Plastics by Thermal and Catalytic Processes: A Review. In: Industrial & Engineering Chemistry Research 47 (2008) no. 21, pp. 7982–7992
7. Bauer, M.; Lehner, M.: Vergleich der Trocken- und Nasssortierung von Altkunststofffraktionen zur Erzeugung eines polyolefinreichen Feedstocks für das rohstoffliche Recycling. In: Thomé-Kozmiensky, K.; Pomberger, R. (Hrsg.): O. Universitätsprofessor Dr. Karl E.

-
- Lorber – Festschrift zur Emeritierung. Neuruppin: TK Verlag, 2013, S. 139–149
8. Bauer, M.: Mechanical Processing of Post-Consumer Plastics for Chemical Recycling. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2014
9. McCulloch, J.; Hölter, H.: Verfahren und Vorrichtung zum Trennen von Mineralien. Patentschrift DE19847229A1. Anmeldedatum: 14.10.1998
10. Lehner, M.; Bauer, M.; Hofer, W.: Stoffliches Recycling Polyolefin-reicher Kunststofffraktionen. In: Pomberger, R. et al (Hrsg.): DepoTech 2014 – Tagungsband zur 12. DepoTech-Konferenz, Montanuniversität Leoben, 2014, S. 593–598
11. Haig, S.; Morrish, L.; Morton, R.; Onwuamaegbu, U.; Speller, P.; Wilkinson, S.: Plastics to oil products, Axion Consulting Ltd, UK, Final report, 2013 <http://www.zerowastescotland.org.uk/sites/default/files/Plastics%20to%20Oil%20Report.pdf>
12. Lederer, C.: Solvent based depolymerisation of polyolefins. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2013
13. Lederer, C.; Lehner, M.: Development of an up-scalable process concept for solvent-based depolymerization of polyolefins. In: CSIR- Indian Institute of Petroleum (IIP) (ed.): 7th International Symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials (7th ISFR 2013) – Abstracts. 23.–26. Oktober 2013, New Delhi, 2013